

Karol BEDNAREK*
Leszek KASPRZYK*

ODKSZTAŁCENIA PRĄDÓW I NAPIĘĆ ORAZ PROBLEMATYKA MOCY BIERNEJ W SIECI ZASILAJĄCEJ OBIEKTU INFORMATYCZNEGO

W pracy przeprowadzono bilans energetyczny oraz badania odkształceń przebiegów napięcia i prądu w układzie zasilania obiektu informatycznego, jakim jest laboratorium komputerowe. Zrealizowano pomiary wartości prądu i napięcia, mocy czynnej, biernej oraz pozornej, współczynnika mocy, całkowitego współczynnika odkształceń THD napięcia i prądu, przebiegów czasowych oraz zawartości harmonicznych prądu i napięcia w rozważanym obiekcie. Analizy realizowane są pod kątem wprowadzania racjonalizacji gospodarowania energią i eliminacji oddziaływania zaburzeń w układach zasilania elektryczne – odbiorniki energii, czyli osiągnięcia korzyści technicznych (niezawodność urządzeń) oraz ekonomicznych (ograniczenie kosztów eksploatacyjnych wynikających z powstających strat mocy oraz opłat za zużycie energii elektrycznej) w użytkowaniu dużych obiektów zasilanych elektrycznie.

SŁOWA KLUCZOWE: jakość energii, przebiegi odkształcone, wyższe harmoniczne, bilans energii, kompensacja mocy biernej

1. WPROWADZENIE

We wszelkich obszarach egzystencji człowieka, zarówno w działalności gospodarczej, jak i życiu prywatnym, powszechnie wykorzystywany jest różnego rodzaju osprzęt elektryczny, elektroniczny oraz informatyczny. Nieustannie wzrasta zapotrzebowanie na energię elektryczną, a jednocześnie wyrafinowane urządzenia techniczne stają się wrażliwe na coraz częściej pojawiające się nieprawidłowości zasilania elektrycznego.

Warunki pracy urządzeń elektrycznych w szczególnym stopniu zależą od jakości doprowadzanej do nich energii, choć powiązane są również z parametrami środowiskowymi, warunkami eksploatacyjnymi itp. Każdy element (układ) włączony do obwodu elektrycznego oddziałuje na niego. Jeśli jest nieliniowy, to wprowadza nieliniowość do obwodu, do którego jest załączany. Wynika stąd jednoznacznie, że odbiorniki energii elektrycznej oraz systemy zasilające wza-

* Politechnika Poznańska.

jemnie na siebie oddziałują. Ich współpraca powinna się odbywać w ten sposób, że nie mogą zakłócać wzajemnie swojego prawidłowego funkcjonowania oraz powinny pracować tak, żeby nie powstawały nieuzasadnione straty energetyczne [1–15].

W pracy zajęto się bilansem mocy oraz jakością energii, związanymi z zasilaniem specyficznego obiektu, jakim jest laboratorium komputerowe. Główną uwagę skupiono na poborze mocy biernej oraz odkształceniach przebiegów napięcia i prądu (harmonicznych). Rozważania związane z jakością zasilania wybranego do analiz laboratorium obrazują warunki funkcjonowania innych obiektów, w których głównymi odbiornikami energii są komputery, serwery, układy zasilania gwarantowanego oraz systemy oświetleniowe.

2. ZAKŁÓCENIA W OBWODACH ELEKTRYCZNYCH

Zarówno w obwodach elektrycznych zasilających, jak i odbiorczych pod wpływem występujących w nich napięć i przepływających prądów generowane są pola elektromagnetyczne. Pola te oddziałują na elementy występujące w otoczeniu, w wyniku czego mogą powstawać sygnały zaburzające, które po dotarciu do elementów wrażliwych mogą zakłócić ich prawidłowe funkcjonowanie. Analogiczne skutki można zauważyć w przypadku wystąpienia stanów łączeniowych, przejściowych, podczas dynamicznych zmian obciążenia itp. Rozprzestrzeniające się generowane wówczas zaburzenia mogą prowadzić do wadliwego funkcjonowania sprzętu lub powstania stanów awaryjnych [1–9].

Niebezpiecznymi dla układów elektrycznych są niekontrolowane, nagłe zaniki napięcia. Mogą one powstawać w wyniku stanów awaryjnych obwodów zasilania elektrycznego bądź celowych wyłączeń określonych odbiorców, wynikających z kłopotów z pokryciem zapotrzebowania na energię elektryczną. W przypadkach częstych załączeń i wyłączeń dużych obciążeń pojawiają się zapady i wzrosty napięcia. Również w stanach łączeniowych, szczególnie w obwodach zawierających elementy bierne (cewki, kondensatory), występują stany przejściowe (nieustalone), których skutkiem jest z kolei powstawanie przepięć, zaburzeń szczególnie niebezpiecznych dla podzespołów elektronicznych. Z uwagi na dynamiczny rozwój systemów elektronicznych i automatyki, w których coraz bardziej powszechnie wykorzystywane są elementy i układy nieliniowe, w obwodach elektrycznych pojawiają się często prądy i napięcia o znacznych odkształceniach. Mają zatem miejsce oddziaływania wyższych harmonicznnych [2–7, 9].

Z rozważań tych wynika, że najbardziej typowymi zaburzeniami rozprzestrzeniającymi się w obwodach zasilania elektrycznego są wahania wartości napięcia (wzrosty i zapady), jego zaniki (długotrwałe bądź krótkotrwałe), przepięcia, zmiany częstotliwości lub odkształcenia przebiegów napięcia lub prądu.

Do skutków ich oddziaływań można zaliczyć powstawanie dodatkowych strat mocy, nadmiernych przyrostów temperatury elementów i podzespołów, wystąpienie stanów awaryjnych urządzeń, pogorszenie trwałości, niezawodności oraz zmianę parametrów technicznych wykorzystywanego osprzętu, utratę przetwarzanych danych i informacji czy nawet powstanie zagrożeń dla zdrowia bądź życia człowieka (funkcjonowanie osprzętu medycznego oraz warunki BHP przy urządzeniach elektrycznych) [4].

Właściwa identyfikacja i eliminacja tych niekorzystnych oddziaływań jest niezbędna w celu zapewnienia prawidłowości pracy eksploatowanego osprzętu elektrycznego oraz zapewnienia bezpieczeństwa człowieka.

W przypadku pracy urządzeń informatycznych największym problemem jest powstawanie odształceń przebiegów prądów i napięć, czyli oddziaływanie wyższych harmonicznych. Z tego względu w dalszej części pracy zamieszczono i skomentowano wyniki badań tych zaburzeń.

3. PRAWIDŁOWE GOSPODAROWANIE ENERGIĄ

Odbiorniki energii pobierają z sieci moc czynną (użyteczną), związaną z wypełnianiem założonych funkcji, np. z przetwarzaniem na inny rodzaj energii, ale także moc bierną, która nie jest użytkowana, choć niezbędna jest do stworzenia określonych warunków fizycznych w układzie, np. wytworzenia pól elektrycznych bądź magnetycznych, gromadzenia energii w tych polach itp. Właściwe gospodarowanie energią polega na ograniczaniu występujących strat mocy oraz zmniejszaniu poboru mocy biernej [1–3, 5, 8, 11].

Eliminacja nieuzasadnionych poborów energii, czyli poprawa efektywności energetycznej w obiekcie polega na wdrażaniu określonych środków naturalnych (głównie na wyłączeniu urządzeń pracujących jałowo), stosowaniu właściwych materiałów i podzespołów (elementów niskostratnych, zwiększających sprawność urządzeń), wykluczeniu oddziaływań wyższych harmonicznych oraz na stosowaniu kompensacji mocy biernej.

Wśród technicznych środków ograniczania poborów mocy biernej wyróżnia się:

- załączanie elementów biernych o przeciwnym charakterze w stosunku do pobieranej w obiekcie mocy biernej,
- wykorzystanie kompensatorów elektromaszynowych,
- zastosowanie elektronicznych przesuwników fazowych.

Często powszechnie uznaje się, że charakter obiektów pobierających duże energie jest rezystancyjno-indukcyjny. Rzeczywiście w większości zakładów produkcyjnych, z uwagi na wykorzystywanie w przeważającej części urządzeń i obrabiarek zawierających silniki, transformatory i inne przetworniki elektro-mechaniczne, pobierana jest oprócz mocy użytecznej moc bierna indukcyjna.

Należy jednak mieć na względzie, że wiele z obecnie eksploatowanych obiektów ma charakter rezystancyjno-pojemnościowy. Będą to głównie jednostki, w których pracują komputery, systemy zasilania gwarantowanego czy nowoczesne energooszczędne systemy oświetleniowe. Można do nich zaliczyć informatyczne centra obliczeniowe, biurowce, banki, galerie handlowe i im podobne obiekty [2, 3, 5].

Z poborem mocy biernej, niezależnie od jej charakteru, powiązane są nieuzasadnione zużycia energii elektrycznej (nie będącej energią użytkową), dodatkowe straty mocy powstające w energetycznych urządzeniach przesyłowo-rozdzielczych, jak również blokowanie możliwości przesyłowych istniejącej infrastruktury technicznej. W celu osiągnięcia racjonalnego gospodarowania energią elektryczną należy identyfikować, a następnie eliminować pobory mocy biernej oraz oddziaływania wyższych harmonicznych (jako przyczyn powstających strat energetycznych).

4. CHARAKTERYSTYKA ROZWAŻANEGO OBIEKTU

Jako obiekt badań poborów mocy biernej oraz odkształceń prądów i napięć wybrano uczelniane laboratorium komputerowe, którego charakter wykorzystywanych obciążeń jest analogiczny jak wielu obiektów, gdzie głównymi odbiornikami załączanymi do sieci zasilającej są elementy struktury informatycznej (komputery, serwery, zasilacze awaryjne itp.), a także elementy i urządzenia związane z oświetleniem oraz kondycjonowaniem powietrza.

Zasilacze impulsowe w komputerach pobierają z obwodu zasilania prąd tylko w chwilach w otoczeniu maksimum sinusoidy napięcia (ładowane są wówczas kondensatory w obwodzie wejściowym). Przebieg pobieranego prądu jest odkształcony i ma miejsce pobór mocy biernej pojemnościowej. Moc bierna pojedynczego zasilacza komputerowego jest niewielka, a pobierany prąd odkształcony ma zbyt niską wartość, aby rozpatrywać negatywne skutki ich występowania w układzie obwód zasilania – odbiorniki energii. W laboratorium komputerowym bądź centrum przetwarzania informacji pracuje wiele komputerów, stąd z uwagi na kumulacyjny charakter pobór mocy biernej oraz odkształcenia całkowitego prądu pobieranego z obwodu zasilania w znaczący sposób rzutują na ocenę jakości gospodarowania energią i oddziaływania zaburzeń w takim układzie [2, 3, 11–15].

Dodatkowo w obiektach tych wykorzystywane jest oświetlenie energooszczędne. W starszych rozwiązaniach wyładowczych źródeł światła stosowane były układy stabilizacyjne, w których występujące dławiki sprawiały, iż oprócz mocy czynnej pobierana była moc bierna indukcyjna. W obecnych energooszczędnych źródłach światła zapłoniki, stabilizatory oraz inne stosowane układy elektroniczne sterowania elementami oświetleniowymi mają najczęściej charak-

ter rezystancyjno-pojemnościowy. W układach tych występuje zatem pobór energii czynnej oraz biernej (najczęściej pojemnościowej) i występują odkształcenia prądu pobieranego przez nie z obwodu zasilania [2–4, 6, 7].

Znaczna część komputerów w obiektach informatycznych (laboratoriach, centrach przetwarzania danych) – w celu ochrony przed niekontrolowanymi zanikami zasilania elektrycznego i możliwością utraty przetwarzanych informacji – zasilana jest z systemów zasilania gwarantowanego UPS. Są to urządzenia, które z uwagi na funkcjonowanie obwodów wejściowych (prostowanie napięcia dostarczanego z sieci oraz jego stabilizacja) pobierają moc bierną pojemnościową, mimo zastosowanych w nich układów PFC (ang. *Power Factor Correction*). Problem ten jest eliminowany na bieżąco w specjalistycznych rozwiązaniach zasilaczy UPS, w których stosowana jest funkcja kompensacji mocy biernej. Rozwiązania takie oferuje firma EVER Sp. z o.o. [2–7, 19].

Zgodnie z wymaganiami aktualnych norm i rozporządzeń [16–18] w sprawie jakości energii elektrycznej w publicznych sieciach elektroenergetycznych elementy i urządzenia do nich załączane mogą pobierać prądy, których odkształcenia nie przekraczają sprecyzowanych w tych dokumentach poziomów (różnych dla określonych grup odbiorników). Z tego względu układy odbiorcze pobierające silnie odkształcone prądy powinny mieć zastosowane w swoich obwodach wejściowych układy PFC (korekcji współczynnika mocy), których głównym zadaniem (szczególnie układów pasywnych) jest ograniczenie oddziaływania wyższych harmonicznych (co realizowane jest z różnym skutkiem), natomiast moc bierna wynikająca z podstawowej harmonicznej jest nadal pobierana z obwodu zasilania. Jest to problem, który należy rozwiązać odrębnie.

5. WYNIKI PRZEPROWADZONYCH BADAŃ

Badania zrealizowano w laboratorium komputerowym, w którym pracowało 16 stacjonarnych komputerów PC z monitorami LCD. Sieć zasilająca jest trójfazowa, przy czym większość funkcjonujących komputerów załączona była na fazę L2. Przeprowadzono pomiary wartości mocy czynnej, biernej i pozornej, prądów, napięć, współczynników mocy, współczynnika odkształceń harmonicznych THD oraz zawartości poszczególnych harmonicznych napięcia i prądu, a także zarejestrowano przebiegi czasowe i charakterystyki widmowe harmonicznych napięć i prądów w sieci elektroenergetycznej w laboratorium.

Na rys. 1 przedstawiono wyniki pomiarów mocy czynnych, biernych i pozornych w poszczególnych fazach oraz całkowitych, a także współczynniki mocy, wartości napięć i prądów oraz częstotliwości napięcia sieciowego. Pobór mocy biernej pojemnościowej był na poziomie przekraczającym 60% użytkowanej mocy czynnej. W przypadku mocy biernej indukcyjnej pobór energii biernej jest uznawany jako ponadnormatywny po przekroczeniu $\text{tg } \varphi = 0,4$, na-

tomiast dla mocy biernej pojemnościowej każdy pobór energii biernej jest traktowany jako ponadnormatywny. Ponieważ opłaty za ponadnormatywny pobór energii biernej są 1,7 ÷ 2,5 krotnie wyższe (zależnie od przyznanej taryfy) niż za energię czynną, to w obiektach o podobnym poborze mocy biernej pojemnościowej jak w badanym laboratorium opłaty miesięczne za zużycie energii biernej są wyższe od opłat za pobór energii czynnej (użytecznej) [3].

a)

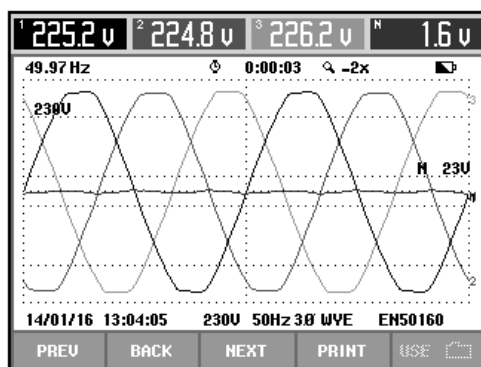
Power & Energy				
FULL 0:00:52				
	L1	L2	L3	Total
kWh	0.31	0.90	0.16	1.36
kVAh	0.32	1.08	0.23	1.62
kVArh	± 0.08	± 0.59	± 0.16	± 0.83
PF	0.97	0.83	0.71	0.84
Cosφ	0.98	1.00	1.00	
Arms	1.4	4.8	1.0	
L1 L2 L3				
Urms	224.7	224.7	225.9	
14/01/16 12:50:02 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
PREV	BACK	NEXT	PRINT	USE

b)

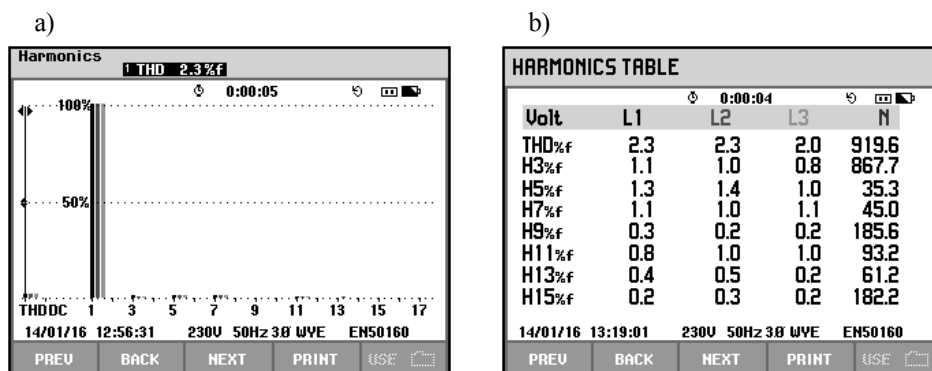
Volts/Amps/Hertz				
0:00:02				
	L1	L2	L3	N
Urms	225.1	224.7	225.6	1.6
Upk	309.6	308.2	311.6	3.3
CF	1.38	1.37	1.38	OL
Hz	49.96			
L1 L2 L3 N				
Arms	1.4	4.9	0.9	0.2
Apk	2.3	10.2	2.2	0.2
CF	1.66	2.08	2.44	OL
14/01/16 13:15:06 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
PREV	BACK	NEXT	PRINT	USE

Rys. 1. Wyniki pomiarów parametrów zasilania w badanym laboratorium
a) moce, współczynniki mocy, prądy i napięcia, b) prądy, napięcia, częstotliwość

Na rys. 2 zaprezentowano przebiegi czasowe napięć fazowych w układzie, a na rys. 3 ich harmoniczne przedstawione w postaci charakterystyki widmowej oraz stabilizowanych zawartości procentowych poszczególnych harmonicznych. Widać wyraźnie, że sinusoidy napięć mają spłaszczone szczyty. Całkowity współczynnik odkształceń harmonicznych THD wynosi 2,3%, a zatem mieści się w granicach dopuszczalnych normatywnie [16–18].

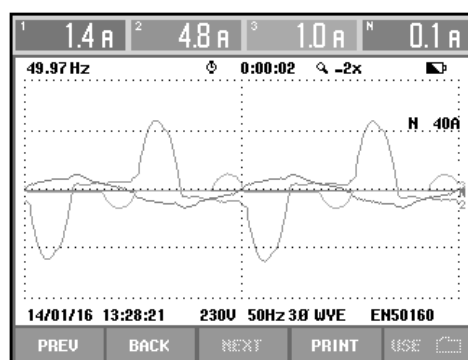


Rys. 2. Przebiegi czasowe napięć fazowych w badanym układzie

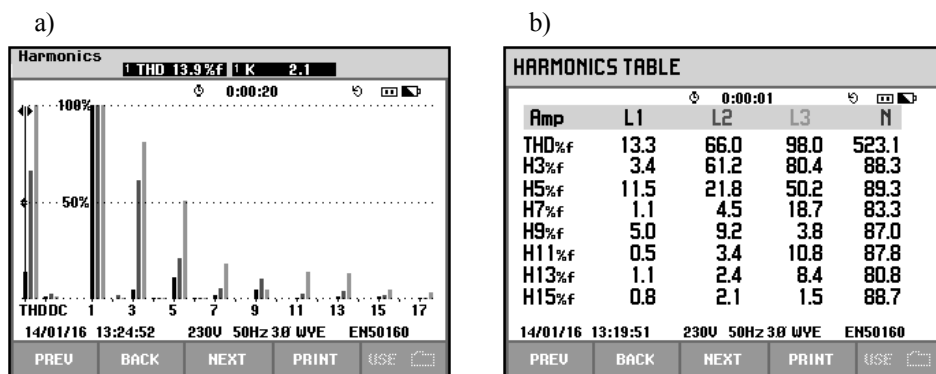


Rys. 3. Wyniki pomiarów harmonicznego napięcia zasilania
 a) charakterystyka widmowa, b) zawartość poszczególnych harmonicznnych

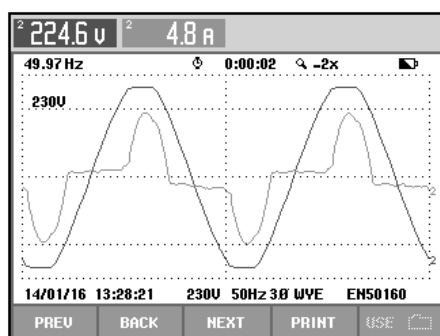
Na rys. 4 oraz 5 zestawiono analogiczne wyniki pomiarów dla prądów pobieranych z sieci. Przebiegi prądów są silnie odształcone, o przebiegu charakterystycznym dla zasilaczy impulsowych (chwilowy pobór prądu w szczytach sinusoidy napięcia). Całkowity współczynnik odształceń harmonicznnych prądu THD_i w fazie L2 przekracza 66%, przy czym najbardziej znaczącymi są 3, 5 oraz 9 harmoniczne. Ewidentnie niższą wartość współczynnik THD_i ma w fazie L1 – na poziomie 13% – załączony był tam projektor multimedialny. Przebieg czasowy prądu tej fazy jest inny niż w fazach zasilających komputery (L2 oraz L3). Zestawienie przebiegów czasowych i harmonicznnych napięcia i prądu dla fazy L2 (najintensywniej obciążonej) zamieszczono na rys. 6 oraz 7. Potwierdzają one wcześniej przeprowadzone rozważania.



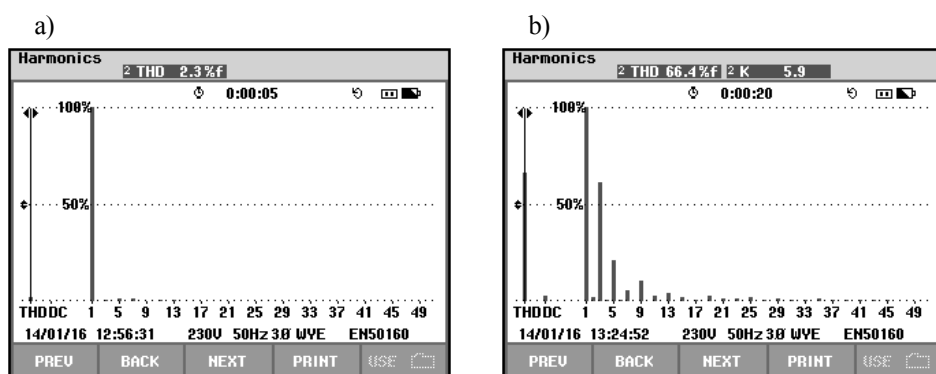
Rys. 4. Przebiegi czasowe prądów poszczególnych faz w badanym układzie



Rys. 5. Wyniki pomiarów harmonicznycch prądów w układzie
a) charakterystyka widmowa, b) zawartość poszczególnych harmonicznycch



Rys. 6. Przebiegi czasowe prądu i napięcia w fazie L2



Rys. 7. Wyniki pomiarów charakterystyk widmowych harmonicznycch
a) napięcia w fazie L2, b) prądu w fazie L2

6. UWAGI PODSUMOWUJĄCE I WNIOSKI

W obiektach informatycznych, z uwagi na charakterystyczną dla nich strukturę odbiorników energii, mogą mieć miejsce oddziaływania zaburzeń elektromagnetycznych (głównie wyższych harmonicznych), jak również pobory mocy biernej pojemnościowej. Ważnym elementem w ich użytkowaniu jest eliminacja oddziaływania wyższych harmonicznych na załączone do sieci wrażliwe urządzenia elektryczne oraz stosowanie kompensacji mocy biernej.

Dbłość o jakość energii i efektywność energetyczną obiektów gospodarczych jest szczególnie istotna z uwagi na osiąganie wzrostu trwałości i niezawodności wykorzystywanego w nich osprzętu elektrycznego (eliminacja oddziaływania zaburzeń), zmniejszanie kosztów eksploatacji obiektów (obniżanie strat energetycznych oraz opłat za ponadumowny pobór energii biernej), a z punktu widzenia dostawcy energii ze względu na zmniejszenie strat w urządzeniach przesyłowo-rozdzielczych oraz odblokowanie możliwości przesyłowych posiadanej infrastruktury technicznej. Wynika stąd, że wiążą się z tym korzyści zarówno techniczne, jak i ekonomiczne osiągnięte jednocześnie przez użytkowników oraz dostawców energii.

Metody zarządzania jakością i efektywnością energetyczną w obiektach gospodarczych będą różne w zależności od ilości i rodzaju pracujących w nich odbiorników energii, ich charakteru, własności funkcjonalnych oraz spełnianych przez nie zadań. Dlatego prawidłowa identyfikacja powstających zaburzeń i poborów mocy biernej jest kluczowym elementem w zapewnianiu najlepszych warunków funkcjonowania wykorzystywanego osprzętu elektrycznego oraz racjonalizacji gospodarowania energią w danej jednostce gospodarczej.

LITERATURA

- [1] Barlik R., Nowak M., Jakość energii elektrycznej – stan obecny i perspektywy, *Przegląd Elektrotechniczny*, 81 (2005), nr 07/08, 1-12.
- [2] Bednarek K., Efektywne systemy zasilania w budynkach inteligentnych, *Inteligentny Budynek*, nr 3 (16), 2014, ISSN 2083-7593, s. 6-7.
- [3] Bednarek K., Elektromagnetyczne oddziaływania i bilans energetyczny w sieci zasilającej w budynku banku, *Przegląd Elektrotechniczny*, No 12 (90), 2014, s. 188-191.
- [4] Bednarek K., Jakość, pewność i właściwa konstrukcja układu zasilania a bezpieczeństwo urządzeń elektrycznych, *Elektro.info*, nr 12, 2012.
- [5] Bednarek K., Kompensacja mocy biernej i praca hybrydowa w systemach zasilania gwarantowanego (UPS), *Poznan University of Technology Academic Journals, Electrical engineering*, Poznań 2013, No 74, 33-41.
- [6] Bednarek K., Wzrost bezpieczeństwa energetycznego poprzez zwiększanie niezawodności systemów zasilania energią elektryczną, *Przegląd Naukowo - Metodyczny. Edukacja dla Bezpieczeństwa*, Rok VII, nr 3/2014 (24), s. 649-664.

- [7] Bednarek K., Kasprzyk L., Suppression of higher harmonic components introduction to the networks and improvement of the conditions of electric supply of electrical equipment, *Przegląd Elektrotechniczny*, No 12b, 2012, s. 236-239.
- [8] Bielecki S., Jakość energii elektrycznej na rynku energii, *Przegląd Elektrotechniczny*, 83 (2007), nr 07/08, 68-72.
- [9] Charoy A., *Compatibilite electromagnetique. Parasites et perturbations des electroniques*, 1-4 (1996), Dunod, Paris.
- [10] Cheng P.T., Lee T.L., Distributed Active Filter Systems (DAFSs): A new approach to power system harmonics, *IEEE Trans. Industry Applications*, 42 (2006), No 5, 1301-1309.
- [11] Czarniecki L., *Moce w obwodach elektrycznych z niesinusoidalnymi przebiegami prądów i napięć*, Warszawa 2005, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- [12] Koziorowska A., Bartman J, Wpływ kompensacji mocy biernej na zawartość harmoniczných na przykładzie urządzeń kopalnianych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr 1, 136-140.
- [13] Pasko M., Lange A., Kompensacja mocy biernej i filtracja wyższych harmoniczných za pomocą filtrów biernych LC, *Przegląd Elektrotechniczny*, 86 (2010), nr 4, 126-129.
- [14] Sosnowski J., *Testowanie i niezawodność systemów komputerowych*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2005.
- [15] Wciślik M., Bilanse mocy w obwodzie prądu przemiennego z odbiornikiem nieliniowym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr 2, 136-140.
- [16] Dz. U. nr 93/2007, poz. 623 – Rozporządzenie Ministra Gospodarki z 4 maja 2007 w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego.
- [17] PN-EN 50160: 2010 – Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych.
- [18] PN-EN 61000-3-2: 2014 – Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Część 3-2: Poziomy dopuszczalne. Poziomy dopuszczalne emisji harmoniczných prądu (fazowy prąd zasilający odbiornika ≤ 16 A.
- [19] <http://www.ever.eu/> [dostęp: 2016.01.15].

CURRENT AND VOLTAGE DISTORTION AND THE PROBLEMS OF REACTIVE POWER IN THE SUPPLY NETWORK OF AN IT SYSTEM

The paper reports the energy balance and investigation of voltage and current distortion in the supply system of an IT unit, namely a computer laboratory. The values of the current, voltage, the active, reactive, and apparent power, the power factor, total harmonic distortion THD voltage and current factor, the timing charts, and harmonic voltage and current components of the considered unit were measured. The analyses were carried out with a view to rationalizing the energy management and eliminating the impact of the disturbances arising in the power supply – power receiver systems. This contributes to technological and economic benefits (reliability of the equipment – reduction of operating cost related to the power loss and electric energy fee) in case of large units supplied with electric power.

(Received: 21. 02. 2016, revised: 4. 03. 2016)